

RESOLUCIÓN GRÁFICA DE CIRCUITOS

Introducción al análisis de circuitos no lineales. Aplicación a circuitos magnéticos

Realizado por Ing. Pablo Morcelle del Valle

1. Introducción

En ciertos casos, la resolución de un circuito por métodos analíticos resulta compleja y a veces muy tediosa. Es el caso de circuitos cuyos componentes poseen características tensión-corriente no lineales. En estas circunstancias, pretender resolver un circuito de este tipo mediante un sistema de ecuaciones no lineales implica utilizar métodos iterativos de aproximaciones sucesivas.

En la actualidad, el masivo uso de las computadoras podría verse como una ventaja ante esta situación, dadas la capacidad de cálculo y velocidad de las mismas. Ésto es cierto, siempre y cuando se justifique la elaboración de un programa que se pueda utilizar un número suficiente de veces que compense el tiempo de programación. De lo contrario, si la necesidad de resolución de un dado problema se da una única vez, la combinación de un método gráfico de resolución y una simple iteración pueden dar lugar a una solución aceptable desde el punto de vista numérico y ventajosa con relación a los tiempos invertidos en la tarea.

Siguiendo dicha línea de pensamiento, en este capítulo se presenta un método gráfico para el planteo y resolución de sistemas no lineales. Se inicia con el estudio de sistemas lineales simples conformados por circuitos eléctricos en continua, con el objeto de comparar la resolución gráfica con la analítica; avanzando hacia sistemas más complejos. A continuación, los conceptos desarrollados se aplican a sistemas no lineales, básicamente compuestos por circuitos magnéticos, recordando la analogía de éstos con los eléctricos. Se debe aclarar que la teoría aquí expuesta para sistemas no lineales es aplicable a cualquier tipo de circuitos de estas características, no sólo a circuitos magnéticos.

2. Sistemas lineales. Circuito eléctrico

2.1. Circuito eléctrico compuesto por una fuente de tensión real y una carga resistiva

Se analizará un circuito lineal simple compuesto por una fuente de tensión con su resistencia interna en serie y una resistencia de carga, según se muestra en la Figura 1.

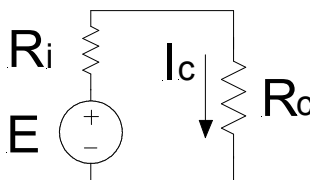


Figura 1

Las ecuaciones que representan el funcionamiento del circuito son

$$E = U_{Ri} + U_{Rc} = I_c \cdot R_i + I_c \cdot R_c = I_c(R_i + R_c)$$

y de aquí $I_c = \frac{E}{R_i + R_c}$ ó $\frac{I_c}{E} = \frac{1}{R_i + R_c}$

lo cual, gráficamente, se puede representar de la siguiente manera

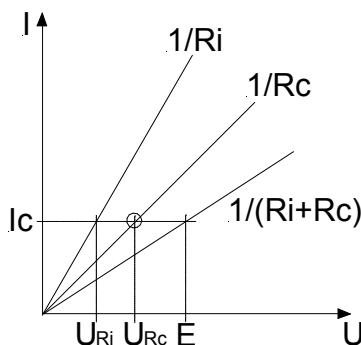


Figura 2

en donde las rectas $\frac{1}{R_i}$ y $\frac{1}{R_c}$ corresponden a las *características U-I* de los resistores respectivos; observándose, además, que la recta $\frac{1}{R_i+R_c}$ es la suma gráfica de las rectas $\frac{1}{R_i}$ más $\frac{1}{R_c}$ a “corriente constante”, es decir que se suman sus correspondientes valores del eje **U** para cada valor de **I**; resultando que dicha composición gráfica corresponde a las dos resistencias en serie, dando origen a una característica equivalente U-I que representa la suma de R_i más R_c .

Con esta construcción gráfica puede determinarse la corriente I_c de la malla completa a partir del valor de $U = E$ sobre la recta $\frac{1}{R_i+R_c}$. De la misma forma, se pueden determinar las caídas de tensión sobre R_i y R_c tal como se observa en el gráfico, cuya suma debe resultar igual a E . También se puede observar en la Figura 2 que el segmento $\overline{U_{Rc}E}$ resulta igual a U_i .

Otra forma de resolver el problema es introduciendo el concepto de **característica de regulación** de la fuente real conformada por E y R_i .

Supóngase ahora que el circuito de la Figura 1 se separa en sus dos elementos componentes, la fuente real y el resistor de carga, tal como muestra la Figura 3.

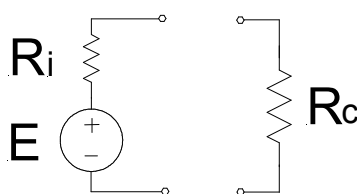


Figura 3

La representación gráfica de cada uno de dichos elementos componentes se muestra en la Figura 4.

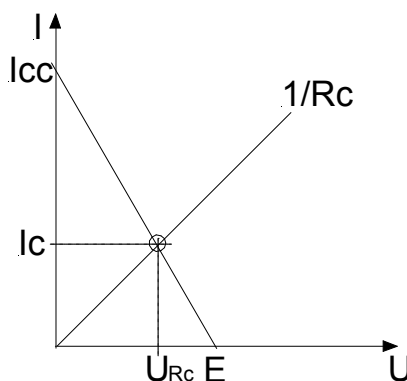


Figura 4

En este punto, no deberían quedar dudas respecto de la representación de la resistencia de carga; pero debe hacerse una mención especial en el caso de la fuente real, la cual está representada en el gráfico por su *característica de regulación*.

La característica de regulación de una fuente de tensión real describe el funcionamiento de la misma para todas las condiciones de carga posibles, desde el circuito abierto hasta el cortocircuito. En estos dos extremos, resulta simple visualizar gráficamente las respectivas situaciones.

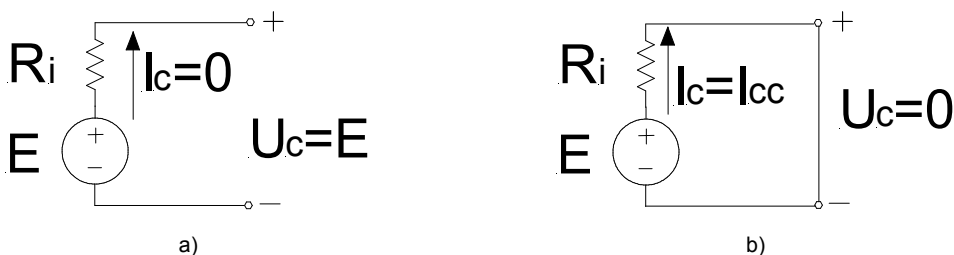


Figura 5

Sean los circuitos de la Figura 5. Se puede verificar rápidamente que para la Figura 5a) resulta

$$U_c = E, \text{ pues } I_c = 0 \quad (\text{circuito abierto})$$

mientras que para la Figura 5b)

$$I_c = I_{cc} = \frac{E}{R_i}, \text{ pues } U_c = 0 \quad (\text{corto circuito})$$

Para cualquier caso intermedio vale

$$E = I_c \cdot R_i + U_c$$

suponiendo que U_c es la caída de tensión resultante en un resistor de carga R_c conectado en bornes de la fuente real, por efecto de la corriente I_c . Debe quedar claro que la pendiente de la recta que representa la característica de regulación de la fuente es igual a la inversa de R_i .

Entonces, dadas las representaciones de la fuente y la carga presentadas en la Figura 4, la intersección de la recta de carga R_c y la característica de regulación de la fuente real, determina el "punto de funcionamiento" del circuito, cuyas coordenadas corresponden a U_{Rc} e I_c .

Si se incorpora al gráfico la recta de carga definida por la resistencia interna de la fuente R_i , la abscisa correspondiente al valor de la corriente I_c para dicha recta resulta coincidente con la caída de tensión en R_i , verificándose que U_{Ri} más U_{Rc} coincide con E , como era de esperar (Figura 6).

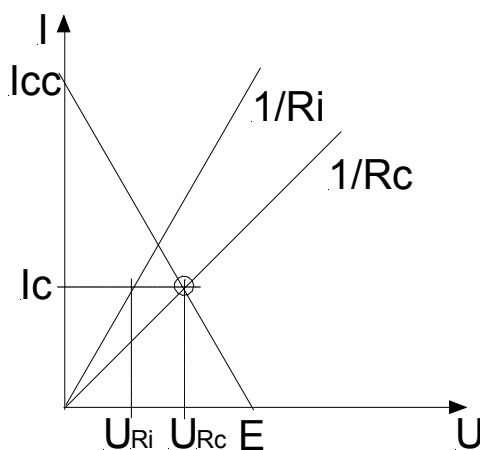


Figura 6

Se pueden analizar circuitos cada vez más complejos, incorporando más ramas en serie y/o en paralelo, o más fuentes de tensión; algunos de cuyos casos se presentan en los puntos que siguen.

2.2. Circuito eléctrico compuesto por una fuente de tensión real y dos cargas resistivas conectadas en paralelo

El presente caso pretende ilustrar acerca de cómo debe operarse gráficamente para obtener el punto de funcionamiento del circuito; es decir, cómo determinar las corrientes de las diferentes ramas, suponiendo como dato los elementos pasivos y la tensión de la fuente. De más está decir que si el dato fuera alguna de las corrientes con la fuente incógnita, también debería poder obtenerse una solución.

Supóngase el circuito de la Figura 7.

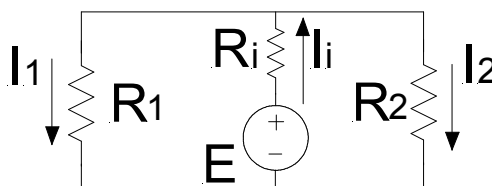


Figura 7

Como se detalló en el punto anterior, deben graficarse las características de los elementos pasivos y la curva de carga de la fuente de tensión, Figura 8.

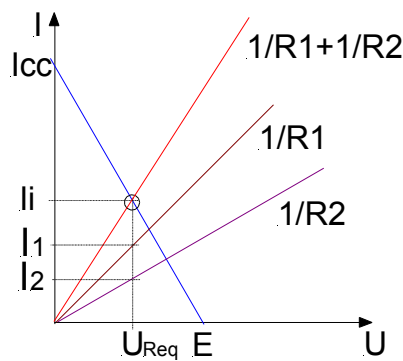


Figura 8

La recta $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ representa el equivalente paralelo de R_1 y R_2 (Figura 9), lo cual se obtiene gráficamente sumando las respectivas características a “tensión constante”.

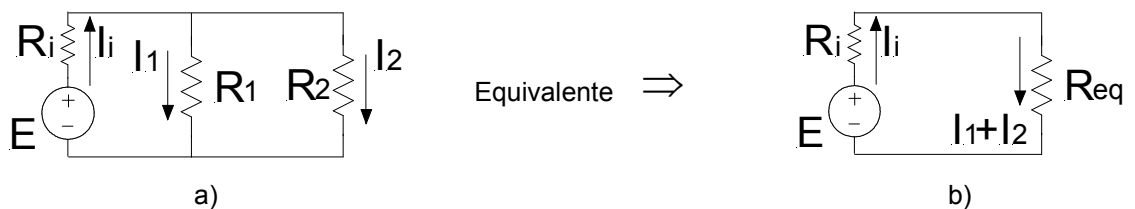


Figura 9

La intersección de la característica de regulación y la del equivalente paralelo determina el punto de funcionamiento del circuito (corriente de la fuente). A partir de éste, se pueden obtener las corrientes de cada rama pasiva, prolongando la proyección de dicho punto de funcionamiento hasta cortar las rectas de $\frac{1}{R_1}$ y $\frac{1}{R_2}$, definiendo sobre el eje vertical las corrientes de las ramas de R_1 y R_2 . En esta condición, es posible verificar claramente que $I_i = I_1 + I_2$, además que $E - U_{Req}$

2.3. Circuito eléctrico compuesto por dos fuentes de tensión reales y una carga resistiva conectadas en paralelo

Fuentes en paralelo con la misma polaridad

La Figura 10 muestra un resistor conectado en paralelo con dos fuentes de tensión, también en paralelo y con las mismas polaridades respecto de los bornes AB.

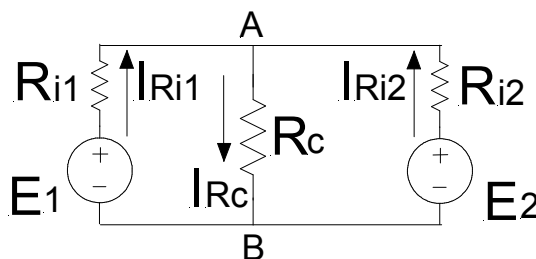


Figura 10

Es posible determinar la fuente equivalente vista desde AB por el resistor de carga R_c , tal como se ve en la Figura 11.

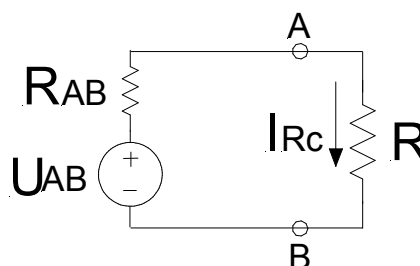


Figura 11

Esta fuente equivalente se determina mediante el método de Thevenin, cuyos parámetros resultan:

$$U_{AB} = \frac{1}{R_{i1} + R_{i2}} (E_2 \cdot R_{i1} + E_1 \cdot R_{i2})$$

$$R_{AB} = \frac{R_{i1} \cdot R_{i2}}{R_{i1} + R_{i2}}$$

La corriente de cortocircuito de esta fuente equivalente resulta del cociente entre U_{AB} y R_{AB} :

$$I_{CC} = \frac{U_{AB}}{R_{AB}} = \frac{E_2}{R_{i2}} + \frac{E_1}{R_{i1}} = I_{CC2} + I_{CC1}$$

de donde se verifica, además, que la corriente de cortocircuito de la fuente equivalente es la suma de las corrientes de cortocircuito de cada fuente individual. La importancia de este resultado radica en la forma de determinación de la característica de la fuente equivalente en forma gráfica, como se verá.

Seguidamente, en la Figura 12, se grafican las características individuales de las fuentes 1 y 2 y de la recta de carga. Se supone que $E_1 > E_2$ y $R_{i1} > R_{i2}$.

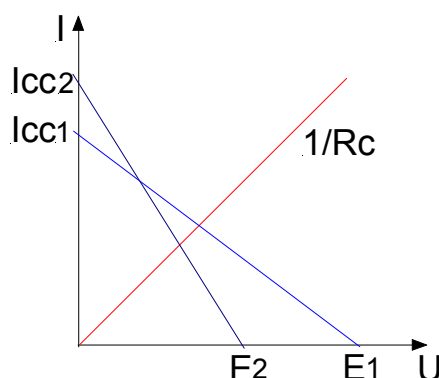


Figura 12

A partir de la Figura 12 y de lo expuesto para el cálculo de la fuente equivalente de Thevenin, se puede determinar la característica equivalente de dicha fuente en forma gráfica. Se describirá sobre la Figura 13 lo antedicho.

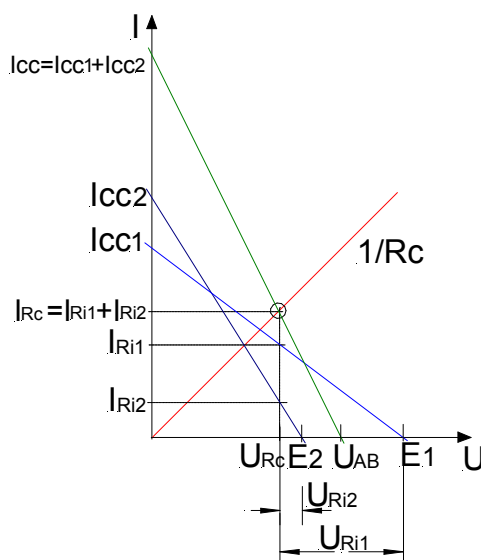


Figura 13

La recta de la fuente equivalente se obtiene de la siguiente manera: a partir de los resultados del análisis por el método de Thevenin, la corriente de cortocircuito equivalente I_{CC} se obtiene como la suma de las corrientes de cortocircuito de cada fuente individual I_{CC1} e I_{CC2} , es decir que en el gráfico **se suman directamente dichos valores de corriente cortocircuito sobre el eje I, resultando que dicho valor es I_{CC} sobre dicho eje**. A continuación, la pendiente de dicha característica se determina sabiendo que R_{AB} es la resistencia equivalente del paralelo de las resistencias internas de las fuentes

R_{i1} y R_{i2} , vale decir que la suma punto a punto “a tensión constante” de las características de regulación de las fuentes 1 y 2, da como resultado la característica de regulación de la fuente equivalente. Esta característica corta al eje U en U_{AB} , lo cual resulta lógico en base a lo expuesto a lo largo del presente capítulo.

Alcanzado este punto, la solución del circuito o “punto de funcionamiento” del mismo resulta el indicado en el gráfico como la intersección de la recta de regulación de la fuente equivalente y la recta de carga de R_c ; y es la solución del circuito de la Figura 11.

El lector puede verificar que los valores restantes indicados en el gráfico de la Figura 13 corresponden a las diferentes corrientes y tensiones que completan la solución del circuito completo original de la Figura 10.

Como corolario de la situación planteada, se puede afirmar que si el número de fuentes conectadas en paralelo es mayor que dos, la suma de las corrientes de cortocircuito de las fuentes individuales debe resultar igual a la corriente de cortocircuito de la fuente equivalente, y la resistencia interna de la fuente equivalente debe ser igual al paralelo de las resistencias internas de las fuentes individuales; esto último, desde el punto de vista gráfico, es equivalente a sumar las características a “tensión constante”.

Fuentes en paralelo con polaridad opuesta

La Figura 14 muestra dos fuentes de tensión con polaridades opuestas conectadas en paralelo, y una posible representación de su circuito equivalente.

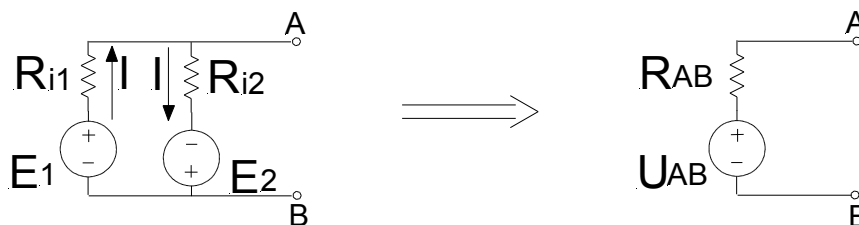


Figura 14

La representación en el gráfico U - I de las características de regulación de cada fuente individual que resulta se muestra en la Figura 15.

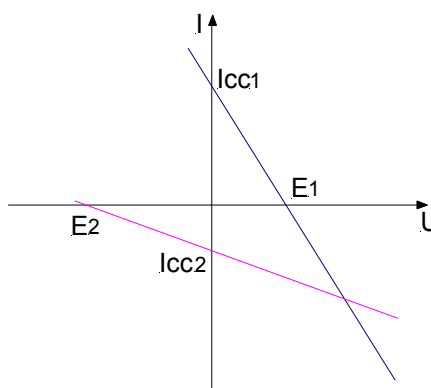


Figura 15

La tensión de la fuente E_2 se sitúa en el semieje negativo de U , dado que resulta de polaridad opuesta a la de la fuente E_1 respecto de los bornes AB. Asimismo, la corriente de cortocircuito I_{cc2} se encuentra sobre el semieje negativo de I , puesto que su sentido es opuesto a la corriente I_{cc1} respecto de los bornes AB.

Al igual que en el caso anterior, se desea determinar la característica de la fuente equivalente vista desde los bornes A y B. Si se aplica el método de Thevenin, resulta:

$$U_{AB} = \frac{1}{R_{i1} + R_{i2}} (E_1 \cdot R_{i2} - E_2 \cdot R_{i1})$$

$$R_{AB} = \frac{R_{i1} \cdot R_{i2}}{R_{i1} + R_{i2}}$$

La corriente de cortocircuito de esta fuente equivalente resulta del cociente entre U_{AB} y R_{AB} :

$$I_{CC} = \frac{U_{AB}}{R_{AB}} = \frac{E_1}{R_{i1}} - \frac{E_2}{R_{i2}} = I_{CC1} - I_{CC2}$$

Con estos resultados se puede graficar la característica de la fuente equivalente respecto de los bornes AB, como muestra la Figura 16.

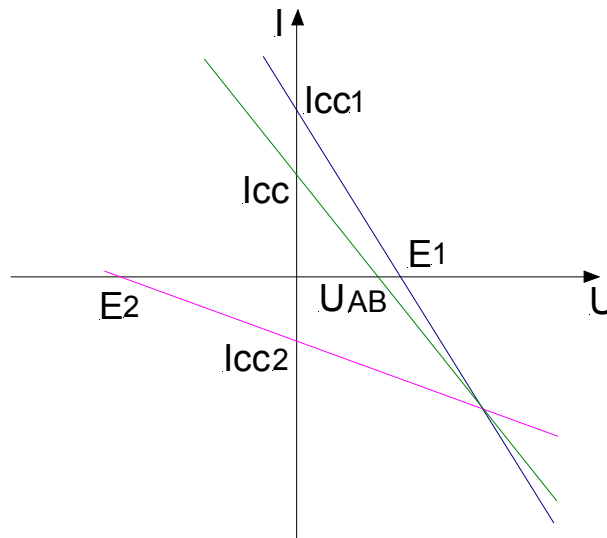


Figura 16

A esta altura del análisis es posible generalizar los resultados del punto anterior de la siguiente manera:

“si el número de fuentes conectadas en paralelo es mayor que dos, cualquiera sea la polaridad de cada una, la suma **algebraica** de las corrientes de cortocircuito de las fuentes individuales debe resultar igual a la corriente de cortocircuito de la fuente equivalente, y la resistencia interna de la fuente equivalente debe ser igual al paralelo de las resistencias internas de las fuentes individuales; esto último, desde el punto de vista gráfico, es equivalente a sumar las características a ‘tensión constante’”.

2.4. Circuito eléctrico compuesto por dos fuentes de tensión reales y una carga resistiva conectadas en serie

Para el caso de un circuito como el descrito en el título, al que le corresponde la Figura 17, el mismo no necesita mayores explicaciones dada la sencillez del caso; sea que las fuentes tengan la misma polaridad o sean de polaridad opuesta. Ello es así, debido a que se debe observar cómo se determina la fuente equivalente de dos o más fuentes conectadas en serie: se suman las tensiones con su signo y se suman las resistencias internas.

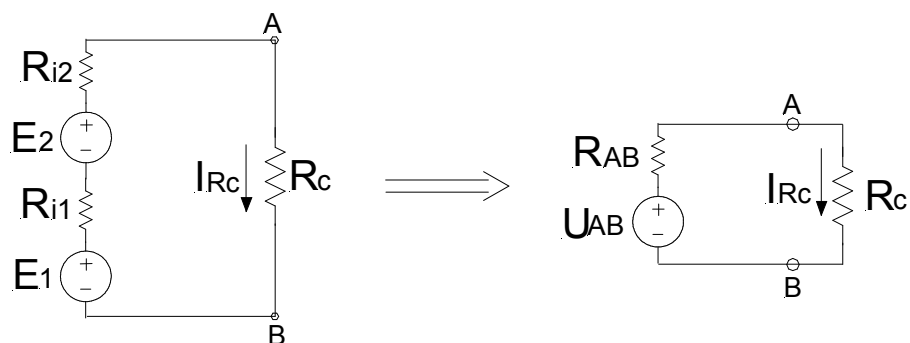


Figura 17

Los gráficos resultan según se muestra en la Figura 18; y los resultados se obtienen operando como en casos anteriores.

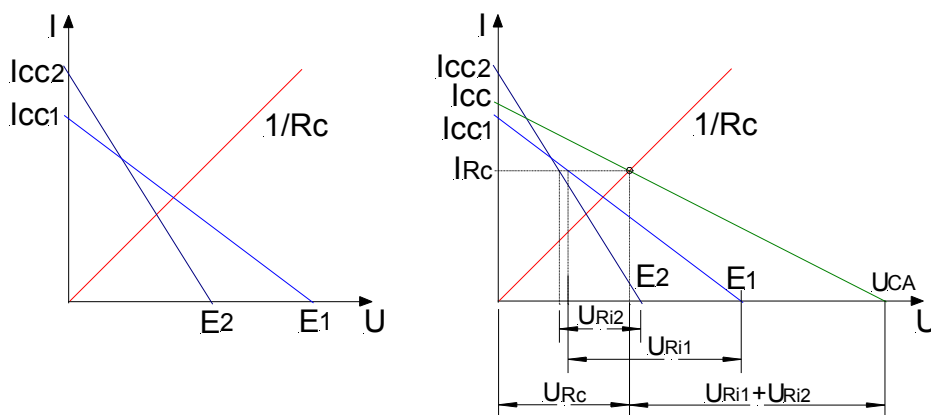


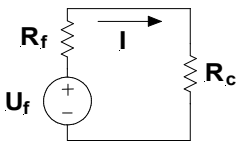
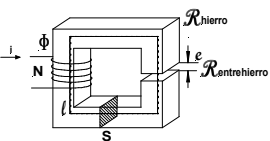
Figura 18

Siguiendo razonamientos expuestos, las características deben sumarse a “corriente constante”, dado que las resistencias internas se encuentran en serie; y el punto de cruce de la característica equivalente con el eje U resulta de la suma algebraica de las tensiones de las fuentes individuales, y corresponde a la tensión de circuito abierto resultante.

3. Sistemas no lineales. Circuito magnético

En los puntos que siguen se aplicarán todas las ideas desarrolladas hasta aquí respecto de la resolución gráfica de circuitos. En particular, se aprovecharán las analogías existentes entre circuitos eléctricos y circuitos magnéticos, las cuales se hallan condensadas en la Tabla I siguiente, la cual es reproducción de la presentada en el capítulo de Circuitos Magnéticos.

Tabla I - Analogías entre circuitos eléctricos y magnéticos

Electricidad	Magnetismo
Corriente eléctrica I	Flujo magnético Φ
Fuerza electromotriz $f_{em} = U_f$	Fuerza magnetomotriz $f_{mm} = N \cdot i$
Caída de tensión U	Caída magnética $H \cdot l$
Resistencia R	Reluctancia \mathcal{R}
Ley de Ohm $I = \frac{U}{R}$	Ley de Hopkinson $\Phi = \frac{H \cdot l}{\mathcal{R}}$
Conductividad $\sigma = \frac{1}{\rho}$	Permeabilidad μ
Expresión de la resistencia $R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\sigma \cdot S}$	Expresión de la reluctancia $\mathcal{R} = \frac{l}{\mu \cdot S}$
Densidad de corriente $J = \frac{I}{S}$	Densidad de flujo $B = \frac{\Phi}{S}$
Leyes de Kirchhoff “eléctricas” $\sum_i I_i = 0$ $\sum_i U_{f_i} = \sum_j I_j \cdot R_j$	Leyes de Kirchhoff “magnéticas” $\sum_i \Phi_i = 0$ $\sum_i f_{mm_i} = \sum_j H_j \cdot l_j$
Circuito eléctrico 	Circuito magnético 

A lo largo de esta parte del presente capítulo se podrá verificar que, dadas las analogías existentes entre los dos tipos de circuitos mencionados, la forma matemática de las ecuaciones son idénticas y los dibujos de los circuitos son similares; la forma de los gráficos también resultan similares. Por lo tanto, la resolución gráfica de los circuitos magnéticos resultará similar a la de los eléctricos.

La gran diferencia reside justamente en la no linealidad de las expresiones que describen el funcionamiento de los circuitos magnéticos. Respecto de esto último, deben recordarse las relaciones existentes entre B y H que caracterizan a los materiales magnéticos.

3.1. Circuito magnético compuesto por una fuente de fuerza magneto motriz y un núcleo magnético cerrado compuesto por dos materiales diferentes en serie

El circuito magnético planteado, mostrado en la Figura 19, se puede asemejar al circuito eléctrico de la Figura 3. En tal sentido, la resolución del circuito magnético por el método gráfico se basa en la resolución del circuito eléctrico y en las analogías de la Tabla I.

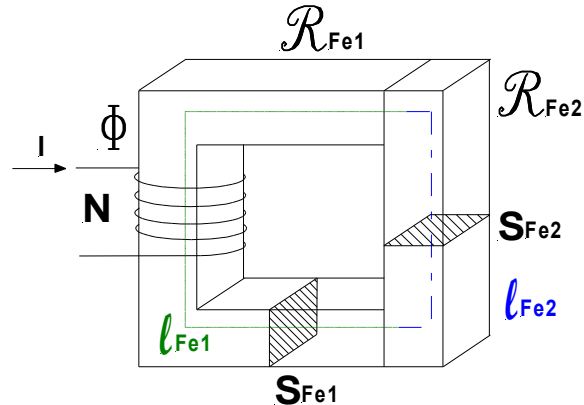


Figura 19

Se debe observar que el circuito de la Figura 19 presenta dos materiales magnéticos dispuestos en serie, cuyas curvas características B-H podrían corresponder a las de la Figura 20; las cuales, como consecuencia de la aplicación de las respectivas geometrías (caminos magnéticos y secciones transversales de los materiales), se convierten en el gráfico BS-Hℓ (o Φ-Nℓ).

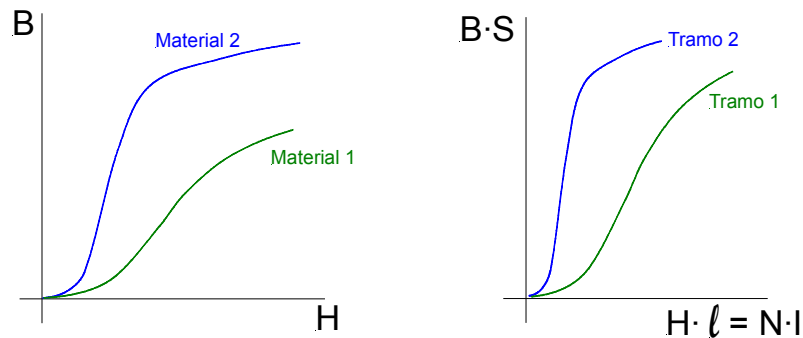


Figura 20

Valga como aclaración indicar en qué consiste “aplicar las respectivas geometrías” para obtener el gráfico BS-Hℓ a partir del gráfico B-H. Esta operación consiste en simplemente **multiplicar cada ordenada de la curva B-H de cada material por la sección del tramo o rama que lo constituye; mientras que las abscisas de los mismos se multiplican por las longitudes de los caminos medios respectivos.**

Por lo tanto, de la analogía eléctrica, por una parte se puede determinar la “*característica de regulación*” de la fuente de fuerza magneto motriz “*real*”, conformada por la bobina y el Tramo 1; y por otra, la “*reluctancia de carga*”, conformada por el Tramo 2. En la Figura 21 se muestra la descomposición del circuito magnético en los dos elementos mencionados y la gráfica BS-Hℓ.

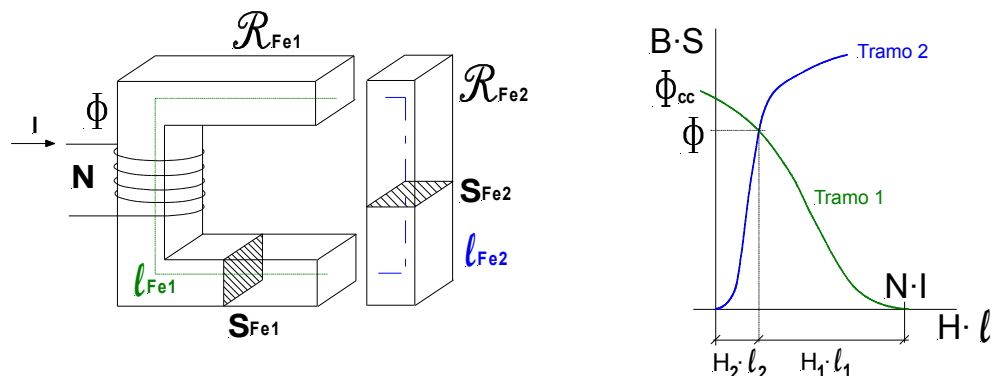


Figura 21

En la gráfica BS-H ℓ se puede observar que la “característica de regulación” corta al eje horizontal en el valor de la fuente de fuerza magnetomotriz N·I, y al eje vertical en un valor de flujo que se ha dado en denominar Φ_{cc} , “flujo de cortocircuito”, el cual debería interpretarse (análogamente a la corriente de cortocircuito del circuito eléctrico) como **el flujo que se obtendría si la fuente de fuerza magnetomotriz estuviese aplicada a una reluctancia equivalente a la \mathcal{R}_{Fe1} que forme un circuito cerrado**. Por otra parte, la intersección de la característica del Tramo 1 y la característica de regulación determina sobre el eje vertical el flujo Φ resultante que se establece sobre el circuito; mientras que sobre el eje horizontal, queda definido un punto al cual concurren las “caídas magnéticas” $H_2\ell_2$ y $H_1\ell_1$ correspondientes a los tramos 2 y 1, respectivamente.

El mismo problema se podría haber resuelto sumando las características de los dos tramos de material ferromagnético (dispuestos en serie), en base a las expresiones de las leyes de Hopkinson y de Kirchhoff para circuitos magnéticos. Para el problema en cuestión, se puede plantear lo siguiente:

$$N \cdot I = H_1 \cdot \ell_1 + H_2 \cdot \ell_2 = \mathcal{R}_1 \Phi + \mathcal{R}_2 \Phi = (\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2) \Phi$$

de la cual se puede despejar el flujo, quedando:

$$\Phi = \frac{N \cdot I}{(\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2)} = \frac{N \cdot I}{\mathcal{R}_{eq}}$$

donde \mathcal{R}_{eq} se obtiene gráficamente mediante la suma “a flujo constante” de las características de los tramos 1 y 2. La expresión “a flujo constante” es análoga a la expresión “a corriente constante” del circuito eléctrico; y gráficamente resulta:

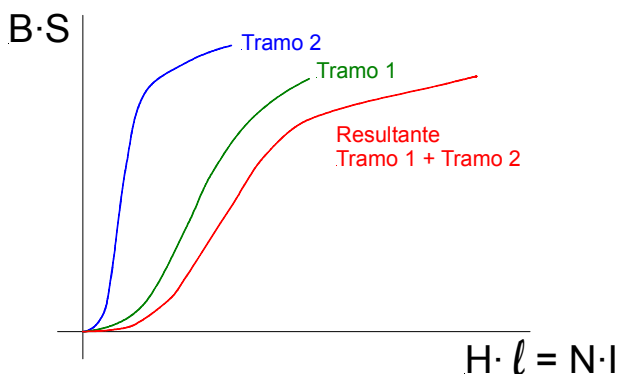


Figura 22

Si en la Figura 22 se introduce el valor de N·I de la fuente de fuerza magnetomotriz, el punto de la resultante sobre el eje vertical representa el valor del flujo del circuito magnético. Los correspondientes valores sobre el eje horizontal de los tramos 1 y 2 para el valor de flujo hallado, resultan las caídas magnéticas en los tramos 1 y 2, respectivamente. El nuevo gráfico se muestra en la Figura 23. Lógicamente, estos resultados deben coincidir con los hallados con el método anterior.

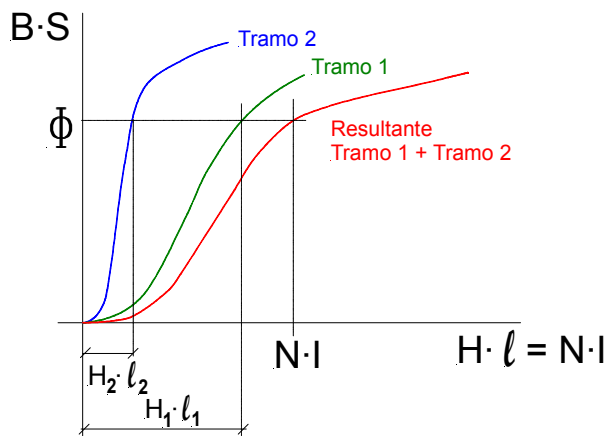


Figura 23

3.2. Circuito magnético compuesto por una fuente de fuerza magnetomotriz y un núcleo magnético de dos mallas y un entrehierro intercalado

El circuito propuesto y el material ferromagnético se muestran en la Figura 24.

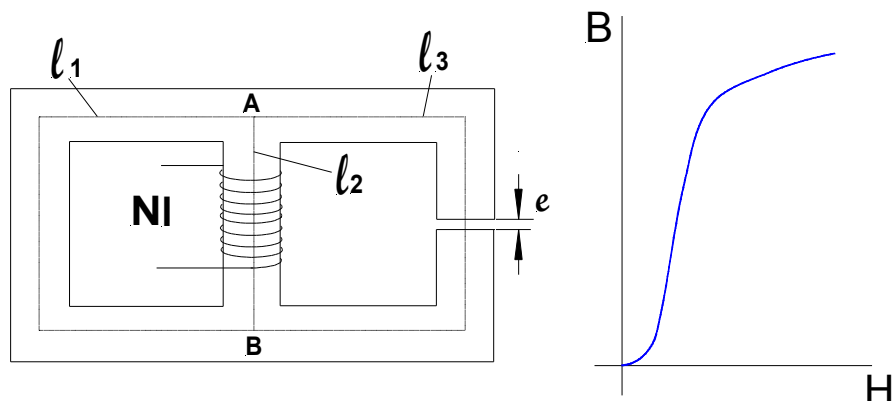


Figura 24

El circuito magnético de la Figura 24 tiene su analogía eléctrica en la Figura 25, la cual es similar al circuito de la Figura 7 teniendo en cuenta la resistencia equivalente que se puede obtener a partir de la serie R_2 y R_3 .

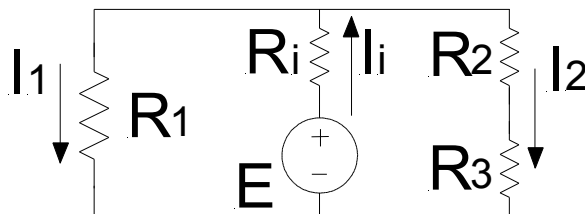


Figura 25

Justamente, para el análisis del presente circuito magnético deberá considerarse la reluctancia de la rama 3 en serie con la reluctancia del entrehierro. A su vez, la resultante de la rama serie anterior se encuentra en paralelo con la rama 1. Consecuentemente, resolviendo de forma adecuada las equivalencias de las ramas según su disposición física original, siempre es posible obtener un circuito como el de la Figura 26a) o 26b), según convenga.

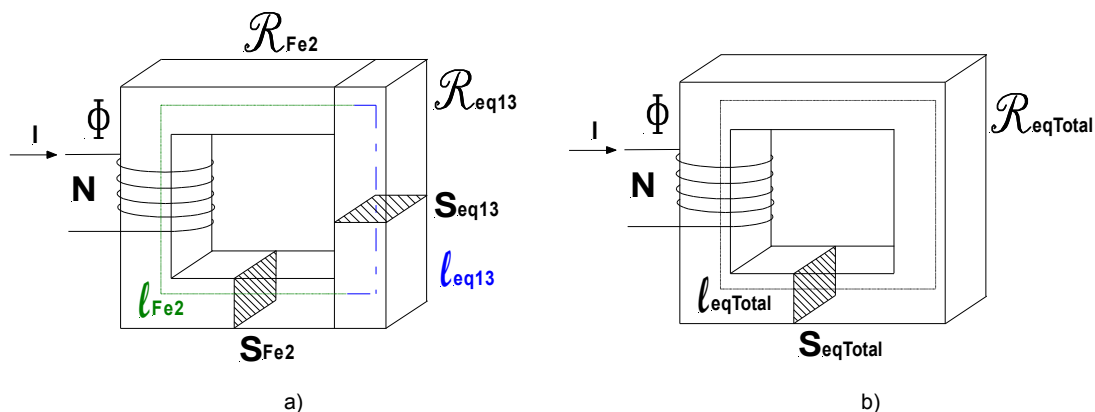


Figura 26

La resolución del presente problema puede afrontarse analíticamente mediante la aplicación de las leyes de Hopkinson y de Kirchhoff para circuitos magnéticos. Normalmente, en este caso, será necesario aplicar métodos de iteración, al presentar comportamiento alineal el circuito. Por lo tanto, y como ya se dijo oportunamente, la solución gráfica siempre es más conveniente y rápida como una primera aproximación al resultado del problema; luego se podrá efectuar alguna iteración para llegar a un resultado más exacto, si fuera necesario.

Entonces, a partir de la curva características B-H de los materiales, hierro y aire, es posible determinar la característica BS-Hl (o Φ -NI), como se muestra en las Figuras 27a) y 27b):

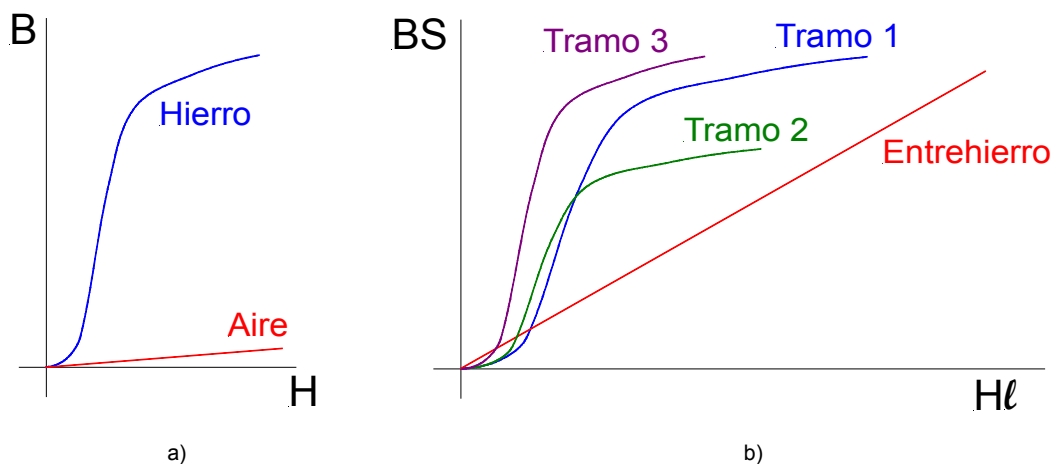


Figura 27

Como se observa en la Figura 27b), tanto la apariencia de la característica del hierro, como la del aire se modifican al pasar del gráfico $B-H$ al $BS-Hl$ (o $\Phi-NI$) por efecto de las geometrías involucradas; obteniéndose tres formas diferentes representativas de cada tramo de hierro.

A partir de esta situación es posible resolver el problema planteado extrapolando los conceptos estudiados en los casos de circuitos lineales. Observando que el Tramo 2 contiene la fuente de fuerza magnetomotriz, dicha característica podrá dibujarse en el gráfico de forma de representar la “*característica de regulación*” de la fuente de fuerza magnetomotriz “*real*”, conformada por la bobina y el Tramo 2; y por otra, la “*reluctancia de carga*”, conformada por el Tramo equivalente conformado por el Tramo 3 en serie con el entrehierro, a su vez en paralelo con el Tramo 1. Esta situación se muestra en la Figura 28, recordando que las características de los tramos conectados en serie se suman “a flujo constante”, mientras que los tramos conectados en paralelo se suman a “fuerza magnetomotriz constante”.

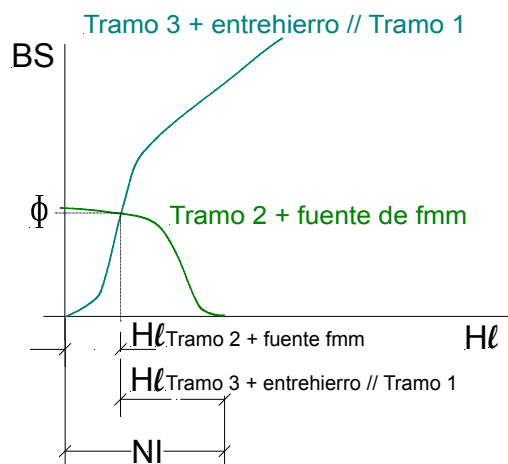


Figura 28

La gráfica de la Figura 28 representa la situación del circuito equivalente de la Figura 26a), donde Tramo 2 + fuente de fmm representa la “*característica de regulación*”, mientras que Tramo 3 + entrehierro // Tramo 1 representa la “*característica de carga*” equivalente del Tramo 3 en serie con el entrehierro y a su vez en paralelo con el Tramo 1.

Se puede observar uno de los puntos de solución del problema corresponde a la intersección de las características del gráfico de la Figura 28; en la cual sobre el eje BS se obtiene el flujo del Tramo 2, y sobre el eje Hl , la caída magnética en el mismo; así como la caída magnética en el tramo equivalente restante, como se muestra en el mismo gráfico. Se debe observar, que la suma de las caídas en los tramos pasivos, debe ser igual a la fuente de fuerza magnetomotriz, de tal forma que se cumpla la ley de Kirchhoff para circuitos magnéticos:

$$N \cdot I = H_2 \cdot \ell_2 + H_3 \cdot \ell_3 = \mathcal{R}_2 \Phi + \mathcal{R}_3 \Phi = (\mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3) \Phi$$

en la cual llamamos $H_2 \cdot \ell_2$ a la caída en el Tramo 2 + fuente de fmm y $H_3 \cdot \ell_3$ a la caída en el Tramo 3 + entrehierro // Tramo 1. De la misma forma identificamos a las respectivas reluctancias.

Otros puntos que son solución del problema se pueden obtener del gráfico completo, es decir aquél en el cual se representan las curvas características de todos los tramos del circuito, tal como se muestra en la Figura 29, además de las características equivalentes.

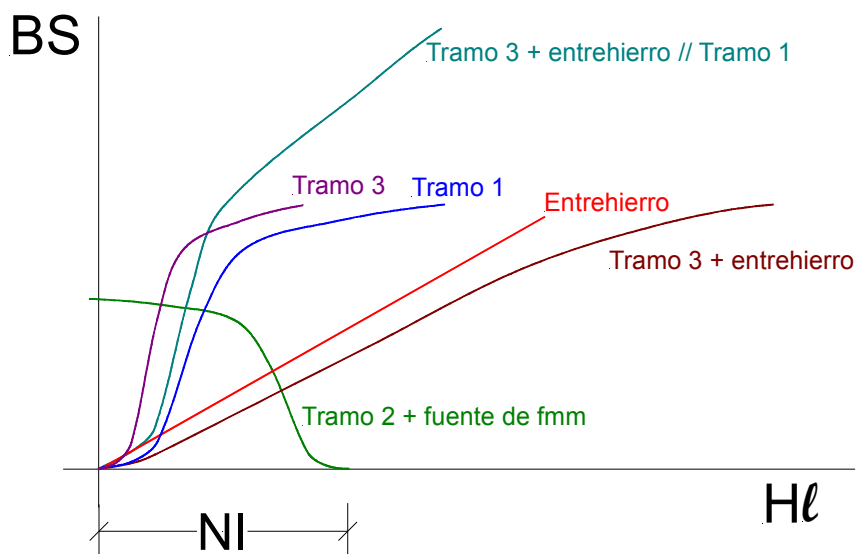


Figura 29

Queda como ejercicio para el lector identificar los flujos y las caídas en cada tramo del circuito magnético, incluido el entrehierro.

Asimismo, el lector deberá verificar la aplicación de las ideas introducidas para circuitos lineales en los diferentes casos de circuitos magnéticos posibles. Por lo tanto, se recomienda enfáticamente adquirir solvencia en la resolución gráfica de circuitos lineales, para facilitar la extensión de dichas ideas al caso de la resolución de circuitos no lineales.

4. Bibliografía

"Circuitos eléctricos y magnéticos. Temas especiales". Erico Spinadel. Editorial Nueva Librería.